

多节漂浮式波能转换装置浮体运动及功率响应

高洪涛* 李彪

(大连海事大学 轮机工程学院 辽宁 大连 116026)

摘要:以多节漂浮式波浪能发电装置为研究对象,基于线性波理论和波-体耦合作用分析,利用刚体动力学方程方法,建立圆柱型波能捕获浮筒在波浪中的垂荡-纵荡-纵摇三自由度非线性耦合运动方程。结合中国黄渤海波浪特点,采用频域分析方法,探讨浮筒纵摇运动特性和功率响应。结果显示,浮筒纵摇运动特性主要受浮筒的固有振动频率和浮筒长度的影响;浮筒长度、PTO 液压阻尼系数及弹簧劲度系数等因素不会影响浮筒的共振频率,半径和吃水则影响显著。这些因素均对功率响应应具有复杂的影响。选择合适的浮筒半径、吃水、弹簧劲度系数等是提高装置的波能转换功率和对中国近海海域适应性的有效途径。

关键词:多节漂浮式浮体;波浪能;功率响应

中图分类号:P743.2

文献标志码:A

Buoy motion and power response for multi-section floating-type wave energy converter

GAO Hong-tao* , LI Biao

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: Taking the multi-section floating-type wave energy converter (WEC) as the study object, the three-degree-of-freedom nonlinear coupled equations of the pitching-surge-heaving motions for the cylindrical wave capture buoy were formulated based on the linear wave theory and wave-body coupled interaction by using rigid body kinematics. Then the pitching motion characteristics and power responses were analyzed by means of frequency-domain in the China Yellow Sea and Bohai Sea. Results show that the main factors which affect the pitching motion are the natural vibration frequency and the length of buoy. The length of buoy, hydraulic damper and spring stiffness coefficient can not affect the resonant frequencies, but the influences of radius and draft are obvious.

All above those factors contribute to complex changes of the power responses. The adjustments of suitable radius, draft and spring stiffness coefficient are the effective ways to improve the transfer power and adaptability to China offshore sea area.

Key words: multi-section floating-type; wave energy; power response

0 引言

中国政府在发布的《中国的能源政策(2012)》白皮书中,承诺到2020年非化石能源占一次能源消费比重将达到15%左右,通过一系列法律、法规的制定实施,促进可再生能源利用技术的发展,其中对波浪能的开发利用技术的跟踪和研发是一个重要项目^[1]。波浪能具有能量品质好、储藏量大、分布广泛的优势^[2-3]。波浪能装置一般不占用宝贵的土地资源,尤其适合服务于远离大陆的边远岛礁的居民或驻军,在推进海洋资源开发、海洋国土保护方面具有重要的现实意义。

世界各国及研究机构已经开发了多种形式的波浪能转换装置及利用技术,其中筏式波浪能转换装置是研究热点之一^[4-7],与其他波浪能转换装置相比,具有单机功率大、转换效率高、海况适应性好的优势。目前,对该类型装置的研究主要以数值计算和模型实验为主。Cockerell首先设计了波面筏式波浪能转换装置;1978年,麻省理工学院 Haren 在其博士论文中对波面筏波能转换相关的运动、效率等问题作了广泛的理论研究^[8]。英国 PWP 公司设计制造的筏式波能转换装置“海蛇”(Pelamis)^[9]号于2004年完成了设计和试验,并

收稿日期:2015-10-23;修回日期:2015-12-22.

基金项目:交通运输部海事局科技项目(2012_26)。

作者简介:高洪涛*(1966-),男,博士,教授,博士生导师,E-mail: gaohongtao@dlmu.edu.cn;李彪(1983-),男,博士生,E-mail: libiaoyx@126.com.

于 2008 年在葡萄牙成功投入商业化运行,其 P2 型装置由 5 节圆柱形浮筒组成,总长 180 m,在运营海域额定发电功率达 750 kW. 陈文创等^[10]采用一阶斯托克斯波理论,研究了截面为椭圆形筏体对称运动时的筏式波浪能装置的波能转换效率. Hedberg 等^[11]通过数值模拟方法讨论了筏体为长方体时的筏式波浪能装置的优化设计问题. 霍杰等^[12]进行了基于 Fluent 的双节长方柱体筏式波能俘获装置浮体在无 PTO (Power Take-Off, 能量提取系统) 阻尼条件下的运动学和动力学分析.

1 数学模型

目前开发的“海蛇”号等筏式波浪能转换装置主要适用于大波高、长周期的欧洲海域,中国近海海域一般波高较小、周期较短,因此,解决装置对于波浪状况的可调性及适应性尤为关键. 大连海事大学高洪涛课题组优化设计了适用于黄渤海海域的漂浮式波浪能转换装置^[13](图 1),并分别于 2012 年和 2013 年在大连海域进行了多次小型装置的海上试验. 装置由多节浮体组成,浮体间铰接. 装置漂浮于海面,在风、浪和锚等的作用下,其纵向方向与波浪传播方向一致. 浮体在波浪作用下做复杂的垂荡-纵荡-纵摇等运动,纵摇运动形成相邻浮体间的相对角位移,推动其液压发电系统中的液压缸运动,从而将波浪能提取出来.

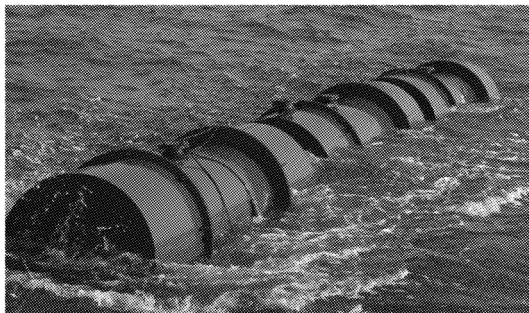


图 1 大连海事大学高洪涛课题组开发的小型多节漂浮式波浪能装置

Fig. 1 The small-sized WECs developed by the research team of Professor Gao Hong-tao

浮体设计对波浪能转换装置的运动性能、功率响应及透浪性能等关键性指标有重要影响. 对其运动特性的精确描述,需建立基于波-体耦合作用的更全面的浮体运动数学模型. 为此,本文采用线性波理论,考虑附加质量和附加惯性矩的影响,推导浮体在波浪中的运动方程,进行浮体纵摇

运动分析和效率响应研究;探讨浮体的结构参数和 PTO 设计等对运动及功率响应的影响,为装置的优化设计和实际应用提供理论依据.

如图 2 所示为多节漂浮式波浪能装置的模型示意图,考虑简化的系统,在直角坐标系 (x, y, z) 中,装置由两节尺寸相等、质量相同且分布均匀的圆柱型浮筒通过二组液压缸连接组成. 浮筒长度为 L ,半径为 R ;静水平衡状态时两节浮筒间距为 l ,吃水为 d . 在波高 H 和波周期 T 的波浪中,装置漂浮在海面,波浪沿 x 轴方向传播,即波浪入射角度为 0° . 两组液压缸相对于浮筒中心线对称布置,活塞在液压缸内作轴向自由往复运动,液压缸作为装置的 PTO 系统的主要部件,提取浮筒捕获的波浪能. 为提高系统的适应性,液压缸安装一定刚度系数的弹簧.

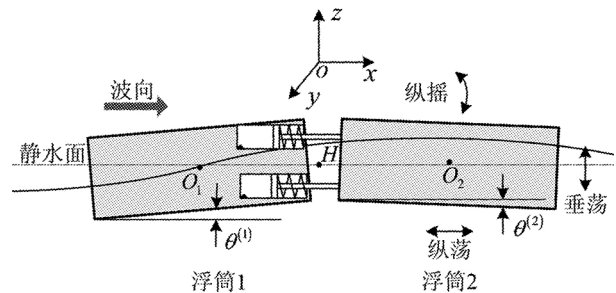


图 2 波浪能转换装置简化模型

Fig. 2 Simplify model of the WEC

在三维空间,浮筒有 6 个自由度的运动. 运行稳定后,只需考虑浮筒的垂荡-纵荡-纵摇三自由度运动. 浮筒在波浪中主要受的力包括:重力 $G^{(n)}$ 、浮力 $F_f^{(n)}$ 、波浪力 $F_h^{(n)}$ 、静水回复力 $F_s^{(n)}$ 、PTO 阻尼力 $F_p^{(n)}$, $n = 1, 2$ 分别表示浮筒 1 和浮筒 2. 根据牛顿第二定律,分别建立浮筒沿 z 轴方向的垂荡运动方程和沿 x 轴的纵荡运动方程.

$$(M^{(n)} + m_z^{(n)}) \frac{d^2 z^{(n)}}{dt^2} = (G^{(n)} + F_f^{(n)} + F_h^{(n)} + F_s^{(n)} + F_p^{(n)}) e_z \quad (1)$$

$$(M^{(n)} + m_x^{(n)}) \frac{d^2 x^{(n)}}{dt^2} = (F_h^{(n)} + F_p^{(n)}) e_x \quad (2)$$

式中: $m_z^{(n)}$ 和 $m_x^{(n)}$ 分别为浮筒在海水中运动的附加质量的垂直和水平分量; e_x 和 e_z 分别为 x 轴、 z 轴单位向量.

PTO 阻尼力分量表示如下.

$$z \text{ 轴分量: } F_p^{(n)} e_z = (F_1 - F_2) \sin \frac{\theta^{(1)} + \theta^{(2)}}{2} \quad (3)$$

$$x \text{ 轴分量: } F_p^{(n)} e_x = (F_1 - F_2) \cos \frac{\theta^{(1)} + \theta^{(2)}}{2} \quad (4)$$

式中: F_1 和 F_2 分别表示上下两组液压缸活塞杆受力; $\theta^{(1)}$ 和 $\theta^{(2)}$ 分别表示浮筒 1、浮筒 2 的纵摇角度。

静水回复力 $F_s^{(n)}$ 表示为^[14]:

$$F_s^{(n)} = -\rho g S_{wp} z^{(n)} \quad (5)$$

式中: S_{wp} 为浮筒静水水线截面积, 对于水平圆柱形浮体: $S_{wp} = 2L \sqrt{2dR - d^2}$; ρ 为海水密度; $z^{(n)}$ 为浮筒垂荡运动位移。

根据动量矩定理建立浮筒的纵摇运动方程。

$$(I_{yy}^{(n)} + I_{ayy}^{(n)}) \frac{d^2 \theta^{(n)}}{dt^2} = [N_p + s(F_1 + F_2)] e_y \quad (6)$$

其中: $I_{yy}^{(n)}$ 和 $I_{ayy}^{(n)}$ 分别表示浮筒相对于 y 轴的转动惯量和附加转动惯量; s 为活塞中心至转动轴的距离向量; N_p 为作用在浮筒上的水压力及重力等对重心的力矩。

$$N_p = \int_{-L}^{-l} (f_{hz}^{(n)} + f_s^{(n)} + f_f^{(n)}) dx \cos \theta^{(n)} + \int_0^{lsl} f_{hx}^{(n)} dz + G^{(n)} (l + L/2) \quad (7)$$

式中: $f_{hx}^{(n)}$ 、 $f_{hz}^{(n)}$ 、 $f_s^{(n)}$ 和 $f_f^{(n)}$ 分别表示波浪力水平分量、波浪力垂直分量、静水回复力和浮力的微元。本问题中的波浪力包括波浪激励力、波浪辐射力及波浪绕射力, 在线性波条件下可以基于速度势理论或弗汝德·克雷诺夫(Froude-Krylow, F-K)假设法进行求解^[15], 表示为^[16]:

$$F_h = \operatorname{Re} [F_0 \exp(-i\omega t)] \quad (8)$$

式中: $\operatorname{Re}[\cdot]$ 表示复数实部; F_0 为波浪力幅值; ω 为入射波浪圆频率。

综合式(1)、(2)和(6) ($n = 1, 2$) 六组方程, 即组成浮筒在波浪中垂荡-纵荡-纵摇三自由度非线性耦合运动方程。

2 计算结果分析

多节漂浮式波能发电装置归类为线式波浪能吸收器, 一般在海水中顺浪布置。多台装置平行阵列布置时, 会通过吸收波浪能起到消波的作用。对于在开阔海域单台布置的装置, 沿装置纵向传播的波浪能衰减后会迅速被周围波浪补充, 在该情况下, 波浪的衰减可以暂不考虑。对于本装置, 浮筒的纵荡运动一般幅度很小, 可以忽略。两节浮

筒具有相同的实数形式表示的垂荡、纵摇幅值等。

浮筒垂荡运动为近似简谐运动, 表达式如下:

$$z^{(n)} = \operatorname{Re} [z_m^{(n)} \exp(-i\omega t)] \quad (9)$$

式中: $z_m^{(n)}$ 为浮筒垂荡运动的复数形式的位移振幅。

浮筒纵摇运动的角度表达式如下:

$$\theta^{(n)} = \operatorname{Re} [\theta_m^{(n)} \exp(-i\omega t)] \quad (10)$$

式中: $\theta_m^{(n)}$ 为浮筒纵摇运动复数形式角度振幅。

两组液压缸采用具有相同规格参数的线性阻尼和弹簧, 即

$$F_1 = C \frac{dc_1}{dt} + Kc_1$$

$$F_2 = C \frac{dc_2}{dt} + Kc_2$$

式中: C 为液压阻尼系数; K 为弹簧刚度系数; c_1 、 c_2 分别为上下液压缸活塞相对缸体平衡位置位移。

PTO 系统的波浪能平均转换功率推导如下:

$$\begin{aligned} \bar{P}_c &= \frac{1}{T} \int_0^T \left(F_1 \frac{dc_1}{dt} + F_2 \frac{dc_2}{dt} \right) dt \\ &\approx \frac{2CR^2\omega^2}{T} \int_0^T \theta^{(rel)2} dt \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\theta^{(rel)}$ 为相邻浮筒间纵摇运动相对角位移, $\theta^{(rel)} = \theta^{(1)} - \theta^{(2)}$ 。

波浪参数取自短周期、小波高的中国黄渤海海域(渤海和黄海北部), 具体如表 1 所示^[17-18]。

表 1 波浪状况参数

参数	数值
波频 / ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.25 ~ 3.14
周期 / s	2.0 ~ 5.0
波高 / m	1.2
水深 / m	25

2.1 纵摇运动及功率响应

选取浮筒长度 $L = 8.0 \text{ m}$, 半径 $R = 1.0 \text{ m}$, 吃水 $d = 1.0 \text{ m}$, 两组浮筒间距 $l = 0.5 \text{ m}$, 液压阻尼系数 $C = 50000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, 弹簧刚度系数 $K = 100 \text{ N/mm}$ 。

图 3 为浮筒纵摇运动和相对角位移幅频响应曲线。纵摇运动和相对角位移幅频响应曲线均出现一个明显的最高值, 纵摇运动幅值峰值出现在 $\omega = 2.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 与浮筒固有振动圆频率接近, 这也是浮筒在波浪中运动的共振点。相对角位移幅值的最大值出现在 $\omega = 1.9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 为两节浮筒纵摇运动及其相位差共同作用的结果。

在计算区域内出现了 A、B 两个幅值接近 0

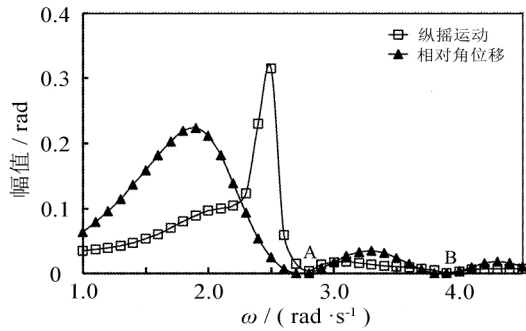


图 3 浮筒纵摇运动和相对角位移的幅频响应曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency response curves of pitching motion and relative angular displacement of buoy

的点,对应的波浪圆频率分别为 $2.8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,波长分别为 7.9 m 、 4.0 m ,分别约等于浮筒长度和长度的 $1/2$ 。出现该现象的原因是浮筒此时所受的总波浪力接近 0,即当波长为筒长的 $1/n$ 时($n=1, 2, 3, \dots$)浮筒的纵摇幅值及相对角位移均为 0。

图 4 为装置转换功率响应曲线。在 $\omega = 1.9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,平均转换功率达到最大值,此后呈波动下降,在 $\omega = 2.8 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $3.9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 相对角位移为 0 时,功率值也为 0。

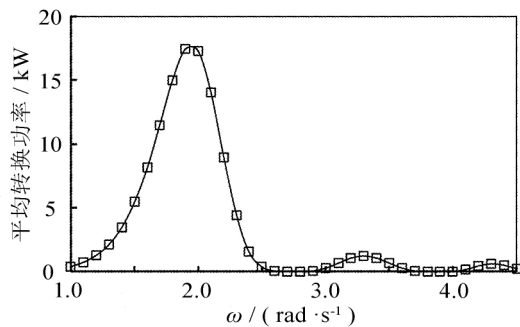


图 4 转换功率响应曲线

Fig. 4 Transfer power response curves

2.2 结构参数的影响分析

2.2.1 浮筒长度的影响

图 5 为浮筒长度对纵摇运动的影响曲线。在弹簧刚度系数、液压阻尼和吃水不变的条件下,浮筒固有振动圆频率基本不变,浮筒纵摇角度幅值最大值出现在 $\omega = 2.5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 处。

图 6 为浮筒长度对平均转换功率的影响曲线。四组曲线峰值所对应的圆频率为 $1.9 \sim 2.0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,与筒长的变化基本无关。在设定参数下,浮筒长度为 8.0 m 时,装置可获得较高的峰值功率。波浪参数一定时,浮筒长度的选择应该参考波

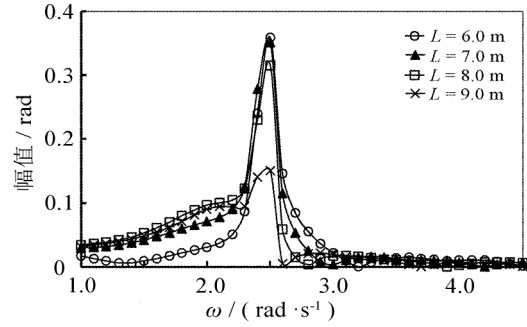


图 5 浮筒长度对纵摇运动的影响曲线

Fig. 5 Pitching motion features with length of buoy 浪状况,以产生足够的波浪力来启动液压系统。

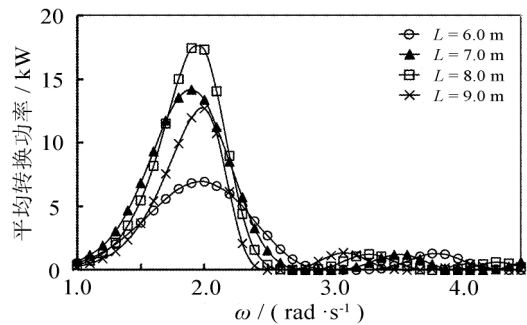


图 6 浮筒长度对平均转换功率的影响曲线

Fig. 6 Average transfer power features with length of buoy

2.2.2 浮筒半径的影响

图 7 为浮筒半径对纵摇运动的影响曲线。四组工况中,设定浮筒吃水等于各自半径。浮筒半径越大,对应的共振频率越小。半径为 1.0 m 时,浮筒在较大波浪频域范围内均具有较大幅度的纵摇运动。

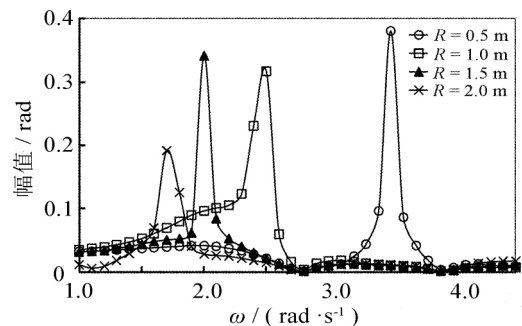


图 7 浮筒半径对纵摇运动的影响曲线

Fig. 7 Pitching motion features with radius of buoy

图 8 为浮筒半径对平均转换功率的影响曲线。随着浮筒半径的增大,装置峰值功率所对应的圆频率减小。在四组工况中,半径为 1.5 m 时,装置具有最高的峰值功率。装置应用于黄渤海出现频率最高的周期为 $2.6 \sim 3.0 \text{ s}$ 、圆频率为 $2.1 \sim$

2.4 $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 的波浪时,选择浮筒半径为 1.0 m 时,可以获得较大的功率,并可适当降低成本。

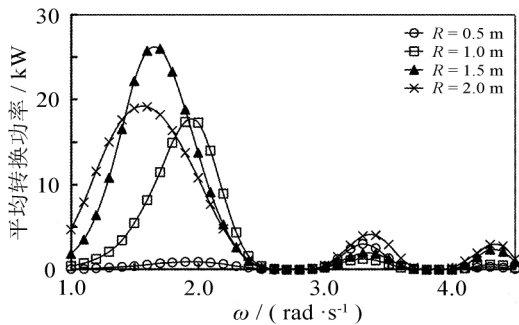


图 8 浮筒半径对平均转换功率的影响曲线
Fig. 8 Average transfer power features with radius of buoy

2.2.3 浮筒吃水的影响

图 9 为浮筒吃水对纵摇运动的影响曲线。吃水的变化改变了浮筒固有振动圆频率,随着吃水的增加,各组曲线的尖峰所对应的圆频率减小。

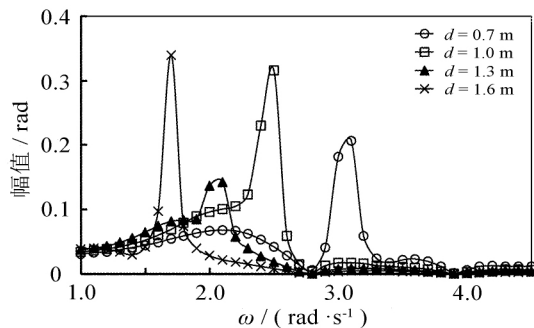


图 9 浮筒吃水对纵摇运动的影响曲线
Fig. 9 Pitching motion features with draft of buoy

图 10 为浮筒吃水对装置转换功率的影响曲线。吃水对功率分布的影响非常显著,可以通过调节浮筒吃水使装置适应不同的波浪状况。装置应用于黄渤海海域时,吃水适宜选择 1.0 ~ 1.3 m。本文选择吃水 1.0 m 进行后续分析。

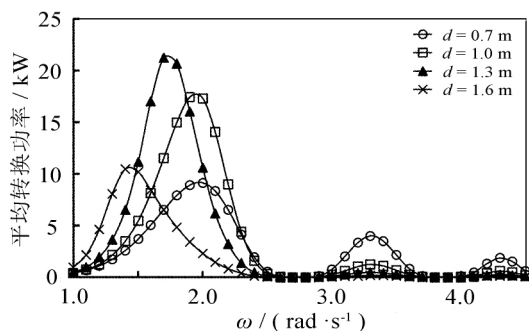


图 10 浮筒吃水对平均转换功率的影响
Fig. 10 Average transfer power features with draft of buoy

2.3 PTO 系统的影响研究

本装置 PTO 系统采用液压式能量转换方案,通过调整液压油的充量和蓄能器的充气压力改变液压阻尼系数。弹簧性能参数的选择也需在装置加工中进行考虑。

2.3.1 液压阻尼的影响

图 11 为液压阻尼对纵摇运动的影响曲线。阻尼系数对浮筒的共振频率基本没有影响,这一点与振荡浮子式等通过垂荡运动捕获波浪能的点吸收式波能转换装置的振动特性不同,该类装置的 PTO 阻尼变化会直接影响浮体的固有频率^[19]。但当液压阻尼为 2000 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 和 30000 $\text{N} \cdot \text{s/m}$ 时,曲线在 $\omega = 2.1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 处出现了一个明显的峰值,这是 PTO 系统与浮筒耦合作用的结果。

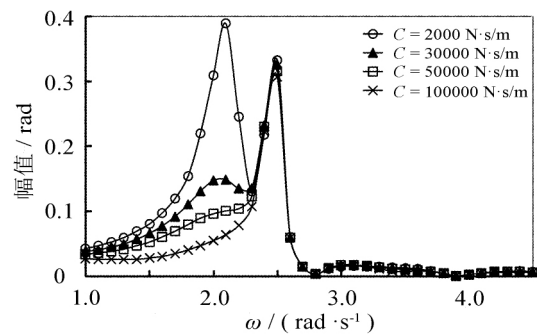


图 11 液压阻尼对纵摇运动的影响曲线
Fig. 11 Pitching motion features with linear damping coefficient of the hydraulic cylinders

图 12 为液压阻尼对平均转换功率的影响曲线。结果显示,阻尼越小,峰值功率及其对应的圆频率值越大,曲线也越陡峭,这导致装置可利用的波浪范围过于狭窄。计算工况下,对于黄渤海海域波浪,选择 30000 ~ 50000 $\text{N} \cdot \text{m/s}$ 的阻尼系数是较为合理的。

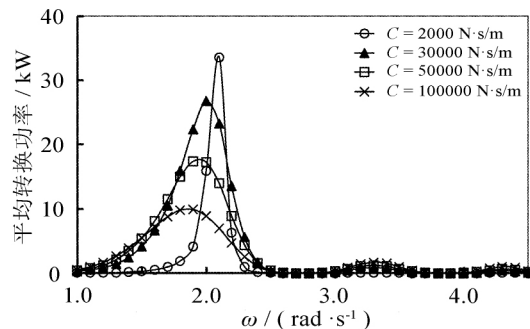


图 12 液压阻尼对平均转换功率的影响曲线
Fig. 12 Average transfer power features with linear damping coefficient of the hydraulic cylinders

2.3.2 弹簧劲度系数的影响

图 13 为弹簧劲度系数对纵摇运动的影响曲线。可以看到,在四组工况下,波浪圆频率在 $1.0 \sim 2.3 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,劲度系数对纵摇运动幅值有影响,但不影响浮筒的共振点。

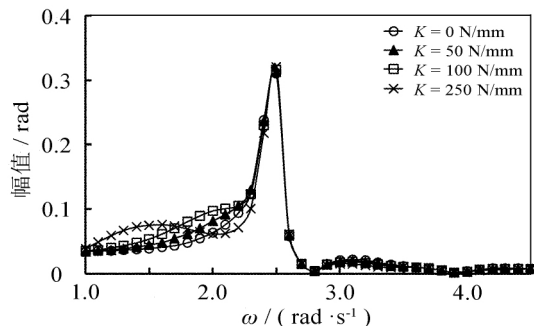


图 13 弹簧劲度系数对纵摇运动的影响曲线

Fig. 13 Pitching motion features with stiffness coefficient of the springs

图 14 为弹簧劲度系数对平均转换功率的影响曲线。可以看出,劲度系数越小,功率峰值所对应的波浪圆频率越大,且对装置可利用的波浪频率范围没有明显的影响。通过配置合适的弹簧,还可以适当提高平均转换功率。因此,选择一定劲度系数的弹簧是提高装置的波浪状况适应性和转换功率的有效途径。

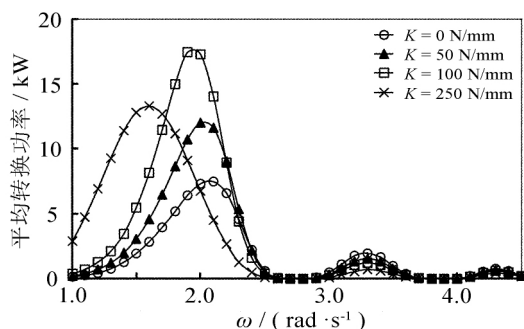


图 14 弹簧劲度系数对平均转换功率的影响曲线

Fig. 14 Average transfer power features with stiffness coefficient of the springs

3 结 论

本文根据线性波理论和刚体动力学方程,建立多节漂浮式发电装置波浪捕获浮筒在波浪中的垂荡-纵荡-纵摇三自由度非线性耦合运动控制方程。采用频域方法,探讨浮筒结构参数、PTO 液压阻尼系数、弹簧劲度系数等对浮筒纵摇运动和功率响应的影响。主要结论如下:

(1) 影响浮筒纵摇运动特性的主要是浮筒的

固有振动频率和浮筒长度。浮筒固有振动圆频率接近波浪频率时,振幅达到最大;波长为筒长的 $1/n$ 时 ($n=1, 2, 3, \dots$) 浮筒的纵摇运动消失。

(2) 浮筒长度、PTO 液压阻尼系数及弹簧劲度系数等因素不会影响浮筒的共振频率,但半径和吃水对其则有一定的影响。以上因素均会显著影响装置的功率响应。

(3) 改变浮筒半径、吃水、弹簧劲度系数等可以有效提高装置的波能转换功率和波浪适应性。

参考文献 (References):

- [1] 中华人民共和国国务院办公厅. 中国的能源政策 (2012) [R]. 北京: [s. n.], 2012.
- [2] BOYLE G. Renewable energy [M]. Oxford: Oxford University Press, 2004: 298-337.
- [3] GONG Yuan. Development trend of wave power generation technology in the world [J]. Power DSM, 2008, 10 (6): 71-72.
- [4] KRAEMMER D, OHL C, MCCORMICK M. Comparison of experimental and theoretical results of the motions of a McCabe Wave Pump [C]//Proceedings of the 4th European Wave Energy Conference 2000.
- [5] SALTER S. The swinging mace [C]//Proceedings of the workshop on wave energy R&D, 1992: 197-206.
- [6] HEATH T, WHITTAKER T, BOAKE C. The design, construction and operation of the LIMPET wave energy converter [C]//Proceedings of the 4th European Wave Energy Conference 2000: 49-55.
- [7] CLÉMENT A, MCCULLEN P, FALCÃO A, et al. Wave energy in Europe: current status and perspectives [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2002, 6 (5): 405-431.
- [8] HAREN P. Optimal design of hagen-cockerell raft [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [9] YEMM R, PIZER D, RETZLER C, et al. Pelamis: experience from concept to connection [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012, 370: 365-380.
- [10] 陈文创, 张永良. 筏式波浪能装置波能转换液压效率的数值研究 [J]. 水力发电学报, 2013, 32 (5): 191-196.

CHEN Wen-chuang, ZHANG Yong-liang. Numerical study on conversion efficiency from wave energy to hydraulic energy by raft-type wave energy converters [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32 (5): 191-196. (in Chinese)

(下转第 56 页)

- ship [D]. Dalian: Dalian Maritime University 2010. (in Chinese)
- [4] LIU W T, TANG Wen-qing, XIE Xiao-su. Wind power distribution over the ocean [J/OL]. Geophysical Research Letters, 2008, 35 (13): L13808. [2008-07-08]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2008GL034172/references>.
- [5] CHENG Fang-yi, GEORGAKAKOS K P. Statistical analysis of observed and simulated hourly surface wind in the vicinity of the Panama Canal [J]. International Journal of Climatology, 2011, 31 (5): 770 – 782.
- [6] ZHENG Chong-wei, PAN Jing, LI Jia-xun. Assessing the China Sea wind energy and wave energy resources from 1988 to 2009 [J]. Ocean Engineering, 2013, 65: 39 – 48.
- [7] CHADEE X T, CLARKE R M. Large-scale wind energy potential of the Caribbean region using near-surface reanalysis data [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2014, 30: 45 – 58.
- [8] 常俊芳. 近岸海洋风能的星载 SAR 遥感技术及应用研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学 2012.
- CHANG Jun-fang. Research on offshore wind energy resources remote sensing technology and applications based on the satellite-borne SAR [D]. Qingdao: Ocean University of China 2012. (in Chinese)
- [9] 马冉祺. 风翼助航船动力装置操纵研究 [D]. 大连: 大连海事大学 2014.
- MA Ran-qi. Study on the manipulation of wing-assisted-ship's power plant [D]. Dalian: Dalian Maritime University 2014. (in Chinese)
- [10] 吕洪刚, 王海燕, 姜亦飞, 等. 西沙大气二氧化碳浓度变化特征研究 [J]. 海洋学报, 2015, 37 (6): 21 – 30.
- LV Hong-gang, WANG Hai-yan, JIANG Yi-fei, et al. Study on the concentration variation of CO₂ in the background area of Xisha [J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37 (6): 21 – 30. (in Chinese)
- [11] 崔开付, 孙即霖, 薛锋. 北印度洋海平面风场的时空特征分析 [J]. 海洋湖沼通报, 2013 (4): 34 – 42.
- CUI Kai-fu, SUN Ji-lin, XUE Feng. Analysis of the spatial and temporal characteristics of sea surface wind field in the North Indian ocean [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2013 (4): 34 – 42. (in Chinese)
-
- (上接第 50 页)
- [11] HEDBERG F, SACCULLO M. Design of a numerical model to analyze a wave energy dissipation device for hydropower [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2014.
- [12] 霍杰. 基于 CFD 的海蟒式俘能装置的水动力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学 2013.
- HUO Jie. Research on hydrodynamic characteristics of pelamis wave power device based on CFD [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology 2013. (in Chinese)
- [13] GAO Hong-tao, LI Biao. ES establishment of motion model for wave capture buoy and research on hydrodynamic performance of floating-type wave energy converter [J]. Polish Maritime Research, 2015, 22: 106 – 111.
- [14] 孙忠锋. 振荡浮子式波浪发电装置研究 [D]. 上海: 上海大学 2007.
- SUN Zhong-feng. Research on oscillating buoy wave power device [D]. Shanghai: Shanghai University, 2007. (in Chinese)
- [15] 吴必军, 王幸, 刁向红, 等. 双圆柱形浮体波能装置双自由度响应及转换效率分析 [J]. 中国科学: 物理学 天文学, 2013, 43 (8): 978 – 986.
- WU Bi-jun, WANG Xing, DIAO Xiang-hong, et al. Response and conversion efficiency of a wave energy device consisting of double cylindrical floats with two degrees of freedom [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2013, 43 (8): 978 – 986. (in Chinese)
- [16] SALTER S. Wave power [J]. Nature, 1974, 249 (3): 13 – 17.
- [17] 尹文昱, 张永宁. 渤海海峡风浪特征统计分析 [J]. 大连海事大学学报, 2006, 32 (4): 84 – 88.
- YIN Wen-yu, ZHANG Yong-ning. Statistical analysis of wind and wave features at Bohai straits [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2006, 32 (4): 84 – 88. (in Chinese)
- [18] 孙丽娟, 高超. 黄渤海风浪气候统计分析 [J]. 世界海运, 2004, 27 (3): 17 – 20.
- SUN Li-juan, GAO Chao. Statistics and analysis on storm and climate of the Yellow Sea and the Bohai Sea [J]. World Shipping, 2004, 27 (3): 17 – 20. (in Chinese)
- [19] 覃岭, 吴必军. 双圆柱形浮体波能装置振动特性分析 [J]. 船舶力学, 2013, 17 (11): 1253 – 1261.
- QIN Ling, WU Bi-jun. Oscillating properties of a wave energy device consisting of double cylindrical floats [J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17 (11): 1253 – 1261. (in Chinese)